12
Rzut oka na rozwój informatyki od Pascala do Turinga i von Neumanna

Rozdział autorstwa Witolda Marciszewskiego z książki: Witold Marciszewski i Paweł Stacewicz, „Umysł – Komputer – Świat. O zagadce umysłu z informatycznego punktu widzenia", Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2011.

Wprowadzenie. Historia informatyki w pełnym formacie musiałaby zapełnić pokaźną liczbę tomów, a pierwszy rozdział tomu pierwszego dotyczyłby liczenia na palcach – genialnego pomysłu naszych prapradziadów (nie wpadły nań tak podobne do nas szympansy, co daje wiele do myślenia na temat osobliwości naszego umysłu). Nie uda się też zmieścić w tym opowiadaniu pasjonujących przygód umysłu z wynalezieniem pisma, matematyki, notacji arytmetycznej, druku, kodeksów prawa (jakby algorytmów życia społecznego), systemów logiki, instrumentów pomiarowych, środków telekomunikacji itd. Siłą rzeczy trzeba poprzestać na wyrywkowej historii kalkulatorów i komputerów przypadającej na czasy nowożytne.

Żeby uwzględnić możliwie wiele faktów, a zarazem pomieścić refleksję na temat umysł-komputer-świat, relacjonuję w tym eseju, w kronikarskim skrócie, okres nowożytny do momentu wkroczenia na scenę dwóch największych aktorów, zwanych nie bez racji ojcami informatyki, Alana Turinga i John von Neumanna. Tak mocno wpłynęli oni na treść informatyki ogólnej (w sensie dyskutowanym w eseju 14), że rozpisana na dwa kolejne odcinki opowieść o ich osiągnięciach i problemach zda zarazem sprawę z żywotnych zagadnień tej dyscypliny,

Turing i von Neumann to heroiczna faza dziejów informatyki, okres wielkich pionierów i kładzenia podwalin. Potem zaś następuje rozwój tak dynamiczny, dzieje się tak niewyobrażalnie wiele, że nie da się tego ogarnąć w jednym eseju, to temat na całą książkę. Żeby się zmieścić w osiągalnych granicach, z tego morza zdarzeń wybrałem jeden nurt, najbliżej związany z głównym tematem książki – zagadką umysłu z informatycznego punktu widzenia. Ogniskuje się ta zagadka w informatycznym zagadnieniu sztucznej

inteligencji i filozoficznym pytaniu o jej stosunek do inteligencji naturalnej. Podejmuję tę kwestię w następnym eseju, będącym kontynuacją obecnego.

Zaczynanie tych partii książki od historii, której się poświęca ten esej i następny, nie do końca jest w zgodzie w wymogiem systematyczności. Ten by dyktował, żeby zacząć raczej od zdania sprawy z szerokiego pojęcia informatyki, które z racji owej rozległości obaj autorzy postanowili nazwać *informatyką ogólną*, a do którego przechodzę dopiero w czwartym tej części eseju. Byłoby to o tyle wskazane, że tytułując oba eseje zwrotem „Rzut oka na dzieje informatyki" mam na uwadze informatykę ogólną, nie zaś ten jej węższy profesjonalny zakres, którego się uczy na wydziałach informatyki w szkołach wyższych. Informatyka ogólna dotyczy nie tylko komputerów; to jej dział wyróżniony lecz nie jedyny. Ogarnia ona wszelkie systemy i narzędzia przetwarzania informacji, w tym żywe komórki, organizmy, umysły i struktury społeczne (instytucje, organizacje, firmy etc.) przez co styka się z jednej strony z biologią, z drugiej zaś z naukami społecznymi.

Nie zawsze jednak porządek systematyczny najlepiej sprzyja zapoznaniu się z zagadnieniem czy nabyciu umiejętności. Koronnym przykładem – nauka języka ojczystego, którego uczymy się najmniej systematycznie, zaś opanowujemy go najlepiej; nabywamy go bowiem w niezliczonych konkretnych sytuacjach, zapadających w pamięć i wyobraźnię (po czym następuje systematyzacja w szkolnej nauce języka ojczystego). Czegoś analogicznego do tej konkretności dostarcza opowieść historyczna. Najpierw na licznych faktach zapoznajemy się z informatyczną problematyką komputerów, organizmów i umysłów, co ułatwia potem generalizację w postaci ogólnej teorii wytwarzania i przetwarzania informacji. Pójdziemy takim właśnie trybem, niejako indukcyjnym, tj. takim, w którym historyczne fakty naprowadzają na teoretyczne generalizacje.

§1. Od pierwszych kalkulatorów do powstania ENIACa

1.1. *Wilhelm Schickard* (1592-1635), niemiecki matematyk i astronom, nawiązał do rozwiązań szkockiego matematyka Johna Napiera (1550-1617), który udoskonalił instrument do liczenia pochodzący z dalekiego wschodu, w Europie stosowany od XIV w. Schickard zbudował ok. roku 1623 pierwszy mechaniczny kalkulator. Zachował się opis przesłany przezeń Keplerowi, który był przypuszczalnie inspiratorem projektu; sam przyrząd uległ zniszczeniu podczas wojny trzydziestoletniej (z zachowanego szkicu odtworzono go w roku 1960).

Nic nie wiedząc o tamtym projekcie, *Blaise Pascal* (1623-1662), francuski matematyk, fizyk, filozof, z intencją ulżenia w rachunkach ojcu, który był poborcą podatkowym, zbudował około roku 1641 mechanizm do dodawania i odejmowania pracujący za pomocą układu kół, każde o dziesięciu zębach,

odpowiadających cyfrom od 0 do 9; przyrząd ten miał też pewne elementy mechanicznej pamięci.

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) – niemiecki matematyk, filozof, inżynier, lingwista i historyk – ulepszył znany mu arytmometr Pascala przez uzupełnienie go o mechanizm umożliwiający mnożenie i dzielenie, stosowany w kalkulatorach mechanicznych aż do ich zmierzchu w połowie XX wieku. Leibniz tak cenił swój wynalazek, że zaprojektował na jego cześć medal z dedykacją „temu, co przewyższył człowieka". Zachował się oryginał przyrządu odnaleziony w 1879 na strychu w Getyndze, obecnie przechowywany w muzeum Leibniza w Hanowerze. Leibniz skonstruował cztery egzemplarze. Jeden przesłał do Piotra Wielkiego z prośbą o przekazanie cesarzowi Chin, by mu uświadomić poziom techniczny Europy jako potencjalnego partnera handlowego.

Konstrukcja arytmometru to tylko jeden rozdział z księgi zasług Leibniza dla informatyki. Porównywalnym osiągnięciem jest system binarny (dwójkowy) notacji arytmetycznej, który jest dziś językiem macierzystym komputerów cyfrowych. Leibniz nie mógł nawet przeczuwać, jaką to znajdzie realizację techniczną w wieku elektryczności, a potem elektroniki, ale miał dosyć wyobraźni, żeby snuć projekty rozwiązań mechanicznych funkcjonujących binarnie. Nie mógł też przewidzieć, że ten błyskotliwy pomysł doskonale zgra się (w konstruowaniu obwodów elektrycznych) z drugim jego projektem: dwuelementowej algebry, z elementami 0 i 1, nazwanej później algebrą Boole'a (który stworzył dojrzałą jej postać). Swą wyobraźnią informatyczną wybiegał w przyszłość tak daleko, że z entuzjazmem kreślił obraz przyszłych maszyn, które będą dowodzić twierdzeń matematyki i innych nauk, tak jak to sobie dziś marzą, a po części realizują, entuzjaści sztucznej inteligencji. Ale i to nie było jeszcze szczytem jego prekursorskich wizji. Był on pierwszym i przez trzy wieki jedynym myślicielem pojmującym wszechświat jako sieć powiązanych jakby jednym programem maszyn do przetwarzania informacji, które określał jako „boskie automaty" (boskie, bo nie będące dziełem człowieka). W swym systemie metafizycznym zwanym *Monadologią* nazwał je monadami, od gr. *monos* (jeden), gdyż każdą taką maszynę uważał za zdefiniowaną przez jedną i niepowtarzalną liczbę. Przez kilka wieków z trudnością radzili sobie z tym osobliwym pomysłem historycy filozofii, ale dla nas brzmi to raczej swojsko, gdyż wiemy, że można stworzyć kod cyfrowy, w którym każda maszyna Turinga otrzyma sobie tylko właściwy numer. W tych wizjach Leibniza można znaleźć inspirujący przykład tego, co określa się w obecnej książce jako światopogląd informatyczny.

Kronika wynalazczości w dziedzinie kalkulatorów zawiera jeszcze kilka znaczących nazwisk z dwóch następujących po Leibnizu wieków. Trudno je wszystkie omawiać w tak krótkim jak obecny przeglądzie, ale jedno zasługuje na wzmiankę jako przyczynek do świadomości informatycznej i zarazem narodowej. Warto wiedzieć, że i na ziemiach polskich dokonywał się pewien

postęp w tym zakresie. Pierwszy w Polsce mechaniczny kalkulator zbudował w 1810 roku żydowski mechanik z Zamościa *Abraham Stern* (przodek poety Antoniego Słonimskiego). Był on wysoce ceniony przez Stanisława Staszica, a jego wynalazek dyskutowano na jednej z Sesji Królewskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk (pełniącego rolę pierwszej polskiej akademii nauk), któremu Staszic przewodził. Z tą postacią i wynalazkiem wiąże się anegdota, która przy okazji pomaga zrozumieć, co miał na myśli Leibniz w swej dedykacji na medalu sławiącym kalkulator jako jestestwo przewyższające człowieka. Otóż okazało się, że kalkulator Sterna potrafi przewyższyć człowieka w szybkości obliczeń, i to nie byle jakiego człowieka, ale samego cara Rosji Aleksandra I. Miał on wysokie mniemanie o swych zdolnościach matematycznych i dla ich wykazania, wyzwał na pojedynek maszynę mechanika z Zamościa. Pojedynek przegrał, a nie tając złości obdarzył konstruktora mało pochlebnym epitetem.

Brzemienny dla informatyki był rok 1805, w którym to roku *Joseph-Marie Jacquard* (1752-1834) we Francji ukończył konstrukcję pierwszej w dziejach automatycznie sterowanej maszyny dla przemysłu tkackiego, nazwanej *krosnem Jacquarda*. Będąc początkiem nowego etapu, stanowiło to zarazem ukoronowanie kilku wieków rozwoju urządzeń z kodem sterującym procesami, jak np. pozytywki. W automatycznych krosnach kod na taśmie perforowanej sterował haczykami wybierającymi nici odpowiedniego koloru do wzorów na tkaninach.

Dwa ważne wydarzenia późniejsze, jedno w połowie 19-go wieku, a drugie pod jego koniec ukazały płodność pomysłu Jacquarda. W połowie wieku nawiązał doń Charles Babbage (o czym niżej), a pod koniec *Herman Hollerith* (1860-1929), pracownik biura spisu ludności USA, w 1890 zbudował pierwszy tabulator – oparte na idei Jacquarda urządzenie do mechanicznego sporządzania zestawień danych, ich klasyfikowania, przetwarzania i powielania. Pozwoliło ono przeprowadzić w USA (wtedy 60 milionów ludności) spis powszechny w dwa i pół roku. Hollerith założył firmę, z której w 1924 wyłonił się IBM. Wpływ idei Jacquarda sięgał aż po wiek 20, docierając do młodego Johna von Neumanna, którego ojciec bankier kredytował na Węgrzech inwestycje związane z krosnami Jacquarda. Był to dla przyszłego „ojca komputerów” pierwszy kontakt z informatyką inspirujący go do przyszłych odkryć i konstrukcji.

1.2. Nową erę w konstruowaniu maszyn liczących ustanowił projekt, którego autorem był *Charles Babbage* (1792-1871), matematyk angielski, który budował od 1821 maszynę różnicową do obliczania określonych funkcji, np. logarytmicznych, działającą na zasadzie impulsów mechanicznych. Z powodów finansowych dzieła nie dokończył; jego projekt zrealizowali inni, a od 1991 w Muzeum Nauki w Londynie funkcjonuje współczesna rekonstrukcja. Od 1834 Babbage pracował nad maszyną analityczną, która miała być urządzeniem liczącym programowalnym i uniwersalnym; do wczytywania danych i zapisywania wyników miały służyć karty perforowane, według idei Ja-

cquarda. Maszyna analityczna była antycypacją uniwersalnego komputera, do której w praktyce konstruktorskiej nawiązał Aiken (zob. niżej), a inspirację teoretyczną czerpał z niej Turing (zob. §2 i następne). Wielce pomocną współpracowniczką Babbage'a była *Ada Lady Lovelace* (1815-1852), córka Lorda Byrona, niezwykle utalentowana matematycznie, ale nie pozbawiona też poetyckiego entuzjazmu swego ojca. Zasłużyła się ona teoretyczną analizą struktury i funkcjonowania maszyny analitycznej, zawarłszy w swym opisie program dla tej maszyny, pierwszy w dziejach informatyki program w dzisiejszym tego słowa rozumieniu. Towarzyszyła temu wizja, że odpowiednio zaprogramowana maszyna może służyć do celów badań naukowych i codziennej praktyki, a nawet komponować muzykę czy tworzyć grafikę.

W tym samym okresie *George Boole* (1815-64), matematyk z uniwersytetu w Cork (Irlandia), choć nie skonstruował żadnej maszyny, wniósł unikalny wkład w rozwój matematyki i logiki, a w przyszłości informatyki. Uczestnicząc w prężnym trendzie badań nad algebrą abstrakcyjną prowadzonych w Wielkiej Brytanii, odniósł na tym polu historyczny sukces. Był to system określany potem jego imieniem jako dwuelementowa *algebra Boole'a*. Jej abstrakcyjność czyni ją wysoce podatną na różnorodne konkretyzujące ją interpretacje, jak logika zdań, teoria zbiorów, a także obwody elektryczne, w których jej dwa elementy symbolizowane przez „1" i „0" interpretuje się jako, odpowiednio, stan pobudzenia (np. impuls elektryczny) i stan braku pobudzenia. Różne konfiguracje przewodów zwane bramkami logicznymi stanowią konkretyzacje kilku funkcji algebraicznych, zwanych boole'owskimi, które w logice oznaczane są symbolami $\neg$, $\wedge$, $\vee$. Bramki logiczne są podstawowym komponentem w procesorach współczesnych komputerów, a funkcje boolowskie obiektami, z którymi nieustannie ma się do czynienia w programowaniu.

Posuwając się dalej w tej kronice tropem chronologicznym, opuszczamy grunt wysokiej abstrakcji i w dziedzinie rozwiązań technicznych dochodzimy do pierwszych komputerów korzystających z elektryczności.

Konrad Zuse (1910-1995) niemiecki inżynier i przedsiębiorca, zaczął prace nad komputerami w 1932 z własnych funduszy, których mu jednak nie starczało na zastosowanie lamp elektronowych. W 1941 ukończył swój pierwszy w pełni programowalny komputer zbudowany na przekaźnikach elektromagnetycznych. Udoskonalony model z 1945 został zakupiony do Zürichu w roku 1950, gdzie pracował przez kilka lat jako jedyny komputer na kontynencie europejskim (obecnie do oglądania w muzeum techniki w Monachium). Do celów wojennych nie był na większą skalę wykorzystany; wedle relacji przypisywanej Albertowi Speerowi, Hitler miał powiedzieć, że do wygrania wojny potrzebne mu jest bohaterstwo żołnierzy, a nie jakieś liczydła.

Howard M. Aiken (1900-1973), pracownik IBM, według pomysłu maszyny analitycznej Babbage'a zbudował w 1939-44 z przekaźników elektromagnetycznych, sterowany programem kodowanym na taśmie perforowanej, komputer Harvad Mark I. Ważył 50 ton; dwie liczby dziesięciocyfrowe

mnożył przez 10 sekund. Pracował przez 15 lat dla potrzeb marynarki wojennej USA.

Colossus pierwszy komputer elektroniczny, zbudowany w 1943, był dziełem zbiorowym, którego Alan Turing był jednym z uczestników. Powstał w Bletchley Park, brytyjskim ośrodku deszyfrowania depesz niemieckich, w którym rozgrywała się akcja deszyfrowania Enigmy, mająca początki w pracach polskiego wywiadu wojskowego i polskich matematyków. Wysoce efektywne maszyny zmagające się z Enigmą nie były jednak na tyle efektywne, żeby deszyfrować coraz bardziej wyrafinowany system kodowania stosowany przez najwyższe dowództwo niemieckie, zwany „Geheimschreiber". Dopiero zastąpienie elementów mechanicznych przez lampy elektroniczne przyniosło pełny sukces. Miarą niezawodności zapewnianej przez ówczesną elektronikę jest to, że Colossus mógł wykonać 10^{11} operacji Boole'a nie popełniając ani jednego błędu.

W roku 1946 Amerykanie posiedli pierwszy elektroniczny komputer *ENIAC*, dzieło trzech konstruktorów z uniwersytetu w Pensylwanii. Pracował do 1955. Wykonywał 5000 operacji na sekundę. Miał 18000 lamp, ważył 30 ton. Programowany był w języku maszynowym za pomocą kabli i przełączników, trzeba więc było zmieniać układ kabli przy przechodzeniu do nowego problemu. Historia konstruowania komputerów nie kończy się na *ENIAC*u, ale w tak pobieżnym przeglądzie trzeba się ograniczyć do zdarzeń uznanych za przełomowe. To było przełomowe w tym względzie, że zapoczątkowało nowy nurt rozwoju, w którym na scenę wchodzą w sposób zdecydowany Amerykanie. Zestawienie dat wskazuje, że to nie oni byli pionierami technologii informatycznej, lecz Niemcy (Konrad Zuse) i Anglicy (Colossus), ale od roku 1946 scenariusz rozwoju tej technologii rozwija się pod znakiem przemożnej dominacji amerykańskiej. Chcąc zdać z niej sprawę, choćby tylko przez podanie listy czołowych firm, wymagałoby znacznie dłuższej opowieści, tak obfity jest to materiał. Zakończymy więc na sławetnym roku 1946. A zamiast wchodzić w gęsty las faktów, skoncentrujemy się w dalszym opowiadaniu na postaciach dwóch uczonych, którzy wywarli największy wpływ na rozwój informatyki, tak w wymiarze podstawowych idei, jak i wyników matematycznych oraz rozwiązań technicznych.

§2. Wkład i znaczenie Turinga

2.1. *Alan Matison Turing* (1912-1954), matematyk z Cambridge, miał drogę do idei komputera utorowaną dzięki brytyjskiej tradycji konstruowania maszyn liczących.[1] Jej najznamienitszym przedstawicielem był Charles Babbage

[1] Postać Turinga, genialna, zagadkowa i tragiczna, z różnych powodów przyciąga uwagę szerokich kręgów publiczności. Obszerny jego życiorys, łączący silną empatię z wielką dokładnością szczegółów, napisał fizyk brytyjski Andrew Hodges. Tytuł oryginału *Alan Tu-*

(zob. wyżej §1). Turing połączył inżynierskie podejście Babbage'a, wyrażające się w terminie „maszyna", z fundamentalną kwestią logiczną postawioną przez *Davida Hilberta* (1862- 1943), określaną jako *problem rozstrzygalności*, w oryginale *Entscheidungsproblem*. Kwestią tą pasjonował się wówczas świat matematyczny, a że odpowiedź odkryta przez Turinga była zaskakująca, idąca pod prąd powszechnym oczekiwaniom, w tym oczekiwaniu Hilberta, zawierający tę odpowiedź artykuł Turinga z roku 1936/37 stał się wydarzeniem na skalę rewolucji naukowej. Oto treść problemu w sformułowaniu zdającym sprawę z oryginalnej wypowiedzi Hilberta.[2]

> Rozwiązanie *problemu rozstrzygalności* polegałoby na posiadaniu procedury algorytmicznej, która o dowolnej formule logicznej pozwoliłaby stwierdzić, czy jest ona tautologiczna (tzn. spełniona dla wszystkich podstawień) lub czy jest spełnialna (tzn. spełniona dla niektórych podstawień). Rozwiązanie to miałoby fundamentalną doniosłość dla wszelkich teorii, których twierdzenia są wyprowadzalne logicznie ze skończonej liczby aksjomatów.

Szczególnie ważną teorią, dla której rozwiązanie tego problemu miałoby fundamentalną doniosłość, jest arytmetyka liczb naturalnych. Żeby ten związek arytmetyki z logiką uchwycić, zauważmy, że każde obliczenie jest w gruncie rzeczy dowodem pewnego twierdzenia arytmetycznego wyprowadzalnego logicznie z aksjomatów arytmetyki, a każdy taki dowód jest obliczeniem. Niech Z będzie jakimś zdaniem arytmetycznym. Dowód zdania Z z aksjomatów A wtedy i tylko wtedy jest możliwy, gdy formuła *„jeśli A, to T"* jest tautologiczna. Jeśliby w jakimś przypadku brakło metody rozstrzygnięcia, czy jest to implikacja tautologiczna, zdanie Z byłoby niedowodliwe. A ponieważ każde obliczenie wartości jakiejś funkcji jest pewnym dowodem na gruncie arytmetyki, niemożliwość dowodu oznaczałaby niemożność obliczenia wartości funkcji, czyli wartość ta byłaby liczbą nieobliczalną.

Turing udowodnił, że istnieją liczby nieobliczalne, a więc i funkcje nieobliczalne, czyli takie, że ich istnienia nie da się dowieść z aksjomatów arytmetyki. A musiałoby się dać dowieść, gdyby o każdej implikacji typu *„jeśli A, to T"* dałoby się rozstrzygnąć, czy jest czy nie jest tautologią, czyli gdyby logika była rozstrzygalna.

Żeby odpowiedzieć na problem Hilberta, Turing – w celu ścisłego zdefiniowania procedury algorytmicznej – wprowadził pojęcie maszyny, dziś funk-

---

ring: The Enigma, 1983. Na polski przełożył Wiktor Bartol pt. *Enigma: Życie i śmierć Alana Turinga*, Prószyński i S-ka, 2002.

[2] D. Hilbert und W. Ackermann, *Grundzüge der theoretischen Logik*, Julius Springer, Berlin 1928. Cytowane zdanie znajduje się w rozdziale trzecim, §11, s. 73. Dane bibliograficzno-historyczne o wymienionym artykule Turinga podaje przypis 11 w eseju 11, §4.1.

cjonujące w określeniach *maszyna Turinga* oraz *uniwersalna maszyna Turinga*, w skrócie UMT.

2.2. Pomysł polega na potraktowaniu formuł matematycznych jako algorytmów przetłumaczonych na programy kierujące obliczeniami. Współdziałają z nimi urządzenia wejścia, do wczytywania danych, i urządzenia wyjścia, do zapisu wyników, oraz pamięć, co łącznie składa się na maszynę wyspecjalizowaną w rozwiązywaniu jednego rodzaju problemów. Jeśli ponadto wyposażyć maszynę w program zdolny imitować wszelkie inne programy, wtedy otrzymujemy maszynę uniwersalną. Jest to abstrakcyjny obiekt matematyczny, który się niebawem zmaterializował w postaci komputera cyfrowego.

Swój wynik uzyskał Turing dzięki metodzie kodowania formuł-programów w postaci liczb naturalnych, której wzór dał *Kurt Gödel* (1906-1978) w roku 1931.[3] Dzięki temu, przy zastosowaniu tzw. dowodu przekątniowego Georga Cantora, staje się widoczne, że zbiór wszystkich maszyn (zdolnych obliczać z dowolną dokładnością nieskończone rozwinięcia dziesiętne), jako równoliczny ze zbiorem liczb naturalnych (co widać dzięki zakodowaniu), jest mniej liczny niż zbiór wszystkich liczb mających takie rozwinięcia. A więc istnieją liczby nie dające się policzyć na żadnej maszynie.

Alonzo Church w tymże roku 1936 doszedł na innej drodze do podobnego wyniku, ale jego związki z informatyką zostały dostrzeżone później, podczas gdy aparatura pojęciowa Turinga została szybko przyswojona w informatyce.[4] Ponieważ wyniki Churcha i Turinga oraz uzyskane niezależnie Emila Posta i inych są równoważne, można jako ich reprezentacji użyć pojęcia maszyny Turinga. W tej roli występuje ono w słynnej *tezie Churcha-Turinga*, która wyraża przekonanie ogółu matematyków, że każde dające się wykonać w języku matematycznym obliczenie może być wykonane przez odpowiednio zaprogramowaną uniwersalną maszynę Turinga, a więc wykonalne dla realizującego ją fizycznie komputera.

Prawie tak samo słynne jak pojęcie maszyny Turinga stało się inne opatrzone jego nazwiskiem – *test Turinga*. Chcąc położyć kres spekulacjom, czy maszyna może myśleć, Turing zaproponował w roku 1950 podejście czysto operacyjne, które nazwano tym terminem.[5] Polega ono na tym, żeby porównywać człowieka i komputer nie wnikając w ich życia wewnętrzne, a tylko obserwując reakcje na pytania. Jeśli kompetentne jury nie będzie umiało odróżnić, które odpowiedzi pochodzą od człowieka a które od maszyny, będzie to świadczyć, że inteligencja maszyny jest nieodróżnialna prak-

---

[3] K. Gödel, *Über formal unentscheidbare Sätze der „Principia Mathematica und verwandter Systeme – I*, „Monatshefte für Mathematik und Physik” 38 (1931), 173–198.

[4] A. Church, *An unsolvable problem of elementary number theory*, „Am.J.Math.” 58 (1936), 345-363. — A. Church, *A note on the Entscheidungsproblem*, „J. of Symbolic Logic” 1 (1936), 40-41, 101-102.

[5] Z. M. Turing, *Computing Machinery and Intelligence*, „Mind”.LIX, no. 2236, Oct. 1950.

tycznie od inteligencji człowieka. Pomysł ten inspiruje organizowane od pół wieku zawody między ludźmi i komputerami w konkurencji „rozwiązywanie problemów", w których dystans między tymi kategoriami zawodników sukcesywnie się zmniejsza. Przedwcześnie byłoby jednak ogłaszać zaistnienie komputerowej inteligencji, choćby dlatego, że inteligencja bardziej jeszcze niż w rozwiązywaniu problemów przejawia się w ich stawianiu, a tej tak niezwykle ważnej zdolności test Turinga nie obejmuje (więcej o słabych stronach testu Turinga – w eseju 13, §3.2).

Mamy więc trzy kluczowe idee informatyczne nazwane od Turinga: maszyna Turinga, teza Churcha-Turinga, test Turinga. To zastawienie mogłoby wystarczyć, żeby w plejadzie najświetniejszych umysłów wznoszących gmach informatyki dostrzec Alana Turinga jako postać dominującą. Jest jednak ktoś, kto oryginalnością swych idei i doniosłością wyników nie pozostaje w tyle, i dlatego podziela z Turingiem zaszczytny przydomek ojca informatyki. Jest on bohaterem kolejnego odcinka tej opowieści.

§3. Wkład i znaczenie von Neumanna

3.1. *John von Neumann* (1903-1957) stał się Johnem w swym wcieleniu amerykańskim. W dzieciństwie, w rodzinie zamożnego budapeszteńskiego bankiera, nazywał się po węgiersku János, co podczas studiów i pracy z Hilbertem w Niemczech zmieniło się na Johannes (tak figuruje w opracowaniach niemieckich), a za oceanem na John. Ta metamorfoza imienia zasługuje na uwagę jako symbol internacjonalizmu nauki. Ten węgierski Żyd o typowo niemieckim nazwisku urodził się w monarchii austro-węgierskiej, formację naukową zdobywał u Hilberta w Getyndze, a bliski był przez współpracę i przyjaźń polskiej szkole matematycznej. Jego zaangażowanie w konstrukcję maszyn cyfrowych i płynące zeń refleksje nad mózgiem zaczęły się w Los Alamos, gdy prace nad energią jądrową okazały się tak złożone obliczeniowo, że wymagały zaprzęgnięcia techniki elektronicznej. Najwybitniejszy uczeń Hilberta wniósł do tych prac kolosalną intuicję i wiedzę logiczną na temat struktury systemów formalnych. W ostatniej fazie twórczości zagłębił się w neurobiologię, kreśląc płodne hipotezy na temat wyrażony w tytule powstałej wtedy książki *The Computer and the Brain* (Yale Univ. Press, New Haven 1958).

Jego wkład do konstrukcji komputerów, wyrażający się w pojęciu *architektury von Neumanna*, wyznacza do dziś sposób działania komputera cyfrowego, mianowicie wykonywanie operacji sekwencyjnie nie zaś równolegle; ten drugi typ architektury był praktykowany wcześniej, a przez von Neumanna został po negatywnych doświadczeniach poniechany. Istotne jest też dla rozwiązań von Neumanna, że ta sama pamięć przechowuje zarówno programy jak i dane. Było to podejście rewolucyjne, bo naturalne zdawało się

odróżniać, przez inną lokalizację w pamięci, jak to jest w przypadku człowieka, stabilny zestaw programów od wciąż zmieniających się danych.

Automat von Neumanna to pomysł poczęty i rozwijany wspólnie ze Stanisławem Ulamem, wybitnym matematykiem polskim ze Lwowa (też na emigracji w USA). Na początku lat 50tych, nie wiedząc nic o wirusach, von Neumann zaprojektował automat zdolny tak jak wirus do tworzenia kopii samego siebie dzięki wbudowanemu programowi samoreprodukcji. Program jest tak pomyślany, żeby materiał do reprodukcji (dla wirusa jest to komórka bakterii lub innego organizmu) mógł być dowolny, co czyniłoby automat zdolnym, w szczególności, do eksploracji kosmosu. Te maszyny von Neumanna, zwane też *automatami komórkowymi* z racji analogii do żywych komórek, są bohaterami śmiałych wizji inżynierii kosmicznej. Automaty komórkowe są też modelami interakcji między elementami środowiska, stąd ich zastosowanie w biologii i w naukach społecznych.[6]

Von Neumann zapisał się jako pionier w wielu działach matematyki, fizyki (aksjomatyzacja mechaniki kwantowej), nawet ekonomii (teoria zachowań ekonomicznych jako gier) i w każdej z tych dziedzin jego nazwisko symbolizuje ważne idee. Dla teorii mnogości, działu matematyki mającego ważne, choć pośrednie, związki z informatyką zasłużył się stworzeniem jednego z nurtów tej dyscypliny określanego jako *teoria mnogości von Neumanna*. A na gruncie tej teorii zdefiniował obiekty znane jako *liczby porządkowe von Neumanna*.

Naliczyliśmy już cztery pojęcia ochrzczone jego imieniem, w tym dwa dotyczące komputerów, co jednak nie wyczerpuje skali jego wkładu informatykę. Obejmuje on także kwestie podstaw informatyki graniczące z filozofią. Jedną z tych kwestii jest stosunek hardware'u do software'u. Bagatelizowanie pierwszego z tych czynników przez Turinga, przy podkreślaniu decydującej roli drugiego, czyniło go niewrażliwym na różnice między, powiedzmy, układem lamp elektronowych i mózgiem. Dla von Neumanna natomiast, jak zobaczymy, była to różnica fundamentalna; wyrażało się to w jego koncentracji na zagadnieniach struktury mózgu zdolnej, jak sądził, realizować logikę potężniejszą niż ta uprawiana za pomocą symboli.

Nim przejdziemy do sedna sprawy, przydadzą się polskie odpowiedniki dla terminów *hardware* i *software*, tak nieznośnych w deklinacji (spróbujmy np. wołacza: „O hardware'rze!"). W obecnym kontekście, nie zamierzając forsować poza nim tej tej decyzji terminologicznej, będę oddawał te dwa pojęcie, odpowiednio, terminami: *czynnik fizyczny* i *czynnik logiczny*.

Przetłumaczenie „software" przez „czynnik logiczny" ma uzasadnienie w analogii między programem komputerowym oraz dowodem twierdzenia, który jest sformalizowany według reguł logiki. Np. program obliczania ko-

---

[6] Zob. J. Von Neumann and A. W. Burks, *Theory of self-reproducing automata*, Urbana„ University of Illinois Press, Urbana 1966. Zob. też Stephen Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media 2002. Chapter 2: History of Cellular Automata.

lejnych wartości w rozwinięciu dziesiętnym liczby π jest to zarazem dowód twierdzenia, że na n-tym miejscu znajduje się taka to a taka liczba.

W opisie maszyny Turinga czynnik fizyczny (hardware) jest przedstawiony schematycznie jako układ obejmujący pamięć, urządzenie czytające, urządzenia piszące i procesor – elementy obecne w każdej maszynie Turinga. Tym, co maszyny te różnicuje, jest czynnik logiczny. Jest to, w najprostszym przypadku, pojedyncza formuła będąca przepisem na obliczanie np. „n+1" (dodawać 1 do kolejnych liczb naturalnych); jest nią twierdzenie Pitagorasa, czy wielkie twierdzenie Fermata, itd. Oprócz takich maszyn wyspecjalizowanych zdefiniował Turing maszynę uniwersalną, zdolną do zastąpienia wszystkich pozostałych.

O każdej maszynie argumentował, że jej potencjał obliczeniowy jest niezależny od czynnika fizycznego. Powiadał, że np. maszyna Babbage'a, od strony fizycznej będąca dziełem ślusarzy (a napędzana maszyną parową) ma dokładnie te same potencje obliczeniowe, co maszyna zbudowana przez elektryków na elektromagnesach, czy przez elektroników na lampach elektronowych itd.; różnice są tylko w szybkości wykonywania obliczeń, co z teoretycznego punktu widzenia nie jest istotne. Ekstrapolując te obserwacje, dochodził do konkluzji, że ten czynnik fizyczny, jakim jest system nerwowy nie wpływa na potencjał obliczeniowy, czyli że jest on taki sam w maszynach i w organizmach.

3.2. Innego zdania był von Neumann. Uważał on, że właściwości fizyczne mózgu decydują o jego odmienności pod względem czynnika logicznego, czyli że nie są to czynniki niezależne. Uważał, że czynnik logiczny maszyny cyfrowej odpowiada językowi logiki i matematyki uformowanemu przez historyczny rozwój tych nauk, podczas gdy strona logiczna systemu nerwowego rządzi się innymi prawami. Ujął to następująco.

> Istnieją w systemie nerwowym struktury logiczne różne od tych, którymi się zazwyczaj posługujemy w logice i matematyce. [...] Tak więc logika i matematyka centralnego systemu nerwowego – jeśli rozpatrujemy je jako języki – muszą strukturalnie różnić się w istotny sposób od tych języków, które są nam dane w codziennym doświadczeniu. [...] Kiedy mówimy o matematyce, omawiamy, być może, język wtórny, zbudowany na języku pierwotnym, którym centralny system nerwowy posługuje się naprawdę. (Zob. *The Computer and the Brain*, 1958).

Co więcej, czynnik logiczny w systemie nerwowym nie tylko jest inny, ale góruje nad tym, który jest związany z logiką symboliczną. Von Neumann doceniał wkład tej ostatniej w zrozumienie, jak działa system nerwowy; był pilnym czytelnikiem przełomowej w tym względzie pracy McCullocha i Pittsa *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity* (1943). Sądził jednak, że powyżej pewnego stopnia złożoności to nie neurobiolog będzie korzystał z dorobku logiki, ale logik z osiągnięć neurobiologii. Słowem, logika z

informatyką będzie się wzorować na żywej przyrodzie. Pisał na ten temat, co następuje.

> Zachodzi pewna równoważność między zasadami logicznymi i ich fizycznym funkcjonowaniem w sieci nerwowej. Ale, podczas gdy w prostszych przypadkach zasady te mogą dostarczyć pewnego uproszczonego opisu sieci, jest zupełnie możliwe, że w przypadku skrajnie wielkiej złożoności prawdą jest zależność odwrotna. Potrzebujemy wprawdzie jakiejś nowej teorii, logicznej co do swej istoty, żeby zrozumieć automaty o bardzo wysokiej złożoności, a w szczególności centralny system nerwowy. Może być jednak tak, że w toku tego procesu logika przekształci się jakby w neurobiologię w znacznie większym stopniu niż ta druga w logikę (*The general and logical theory of automata*, 1951).

Powstaje wtedy pytanie, czy ten doskonalszy od elektronicznego system biologiczny pozostaje w gruncie rzeczy maszyną Turinga, tyle, że sprawniejszą technicznie niż inne jej realizacje, czy też posiada większe od niej moce obliczeniowe. Trudno na to znaleźć odpowiedź u von Neumanna. Szkicuje on na gorąco hipotezy poruszając się po gruncie absolutnie nowym; książka *The Computer and the Brain* pozostała jako niedokończony rękopis, nad którym pracował do ostatnich dni życia, wydany pośmiertnie przez żonę.

W tej sytuacji, w charakterze eksperymentu myślowego załóżmy, że system nerwowy jest maszyną Turinga, zaś symbole zapisywane na jej taśmie są elementami jakiegoś kodu neuronowego. Przy tym założeniu, wróćmy do pytania, czy przyjęcie aksjomatów arytmetyki, które są przecież jakoś zakodowane w mózgu matematyka, może być wynikiem procesu realizowanego przez maszynę Turinga; krócej – procesu Turinga.

Chodzi o proces dokonujący się w czyimś indywidualnym mózgu. Oto przykład. Niech stan, w którym maszyna zakończy pracę, będzie taki jak stan mózgu włoskiego matematyka Giuseppe Peano pewnego dnia roku 1889, kiedy to sformułował on po dziś dzień stosowaną aksjomatykę arytmetyki liczb naturalnych; od jego imienia teoria ta nazywa się arytmetyką Peano.

Nie musimy rozważać wszystkich jej aksjomatów; dla ustalenia uwagi weźmy pod uwagę jeden, mianowicie aksjomat indukcji matematycznej (dokładniej, schemat aksjomatu, ale nie musimy wchodzić w takie szczegóły). Powiada on, co następuje: jeśli jakąś własność ma zero oraz prawdą jest, że gdy ma ją jakakolwiek liczba, to ma ją też następnik tej liczby, wtedy własność ta przysługuje wszystkim liczbom naturalnym. Aksjomat ten zakłada pojęcie nieskończonego zbioru liczb naturalnych.

Stan, w którym maszyna zakończy pracę będzie to taki, że w tkance nerwowej zostaną zapisane aksjomaty Peano nie mniej precyzyjnie niż my je zapisujemy w języku logiki symbolicznej. A jak sobie wyobrazić punkt wyjścia? Trzeba skorzystać tu z lekcji, jaką daje wiedza o ewolucji kulturowej. Badaczom kultur pierwotnych zawdzięczamy spostrzeżenie, że istnieją ludy pier-

wotne, które mają nazwy tylko dla liczb 1 i 2, a wszystko to, co powyżej określają słowami w rodzaju „mnóstwo". Oczywiście, nie są to umysły zdolne do sformułowania zasady indukcji czy innych aksjomatów arytmetyki. Na takim poziomie ewolucji musieli być kiedyś prapradziadkowie współczesnych matematyków, dokonał się więc w międzyczasie proces warunkowanych kulturowo transformacji w kodzie mózgowym. I teraz wraca pytanie: czy jest proces wykonalny dla maszyny Turinga? Odpowiedź samego Turinga byłaby pewnie twierdząca. Odpowiedź von Neumanna byłaby przecząca. Pierwszy bowiem z cytowanych jego tekstów mówi o istotnej różnicy między matematyką mózgu i tą wytworzoną historycznie, której twierdzenia zapisujemy na papierze, a która jest identyczna z matematyką dającą się wyprodukować na maszynie Turinga; drugi zaś wyraża myśl, że teoria logiczna opisująca funkcjonowanie mózgu (jeśliby taką udało się stworzyć) byłaby zdolna ująć o wiele większą złożoność niż owa teoria wytworzona historycznie czyli równoważna produktowi maszyny Turinga. Tę przewagę dawałaby kolosalnie wyrafinowana konstrukcja mózgu.

Jest to stanowisko o istotnych konsekwencjach dla roznamiętniającego badaczy pytania o możliwość stworzenia sztucznej inteligencji dorównującej inteligencji człowieka. Von Neumann odpowie: owszem, ale pod warunkiem że sztucznie, w jakimś laboratorium otrzymamy odpowiednio złożoną strukturę żywych komórek. Turing natomiast będzie zdania, że tworzywo się nie liczy: może to być „pęczek drutu, a nie koniecznie substancja o konsystencji gęstej owsianki" (jak obrazowo porównał urządzenie elektryczne z mózgiem). Liczy się tylko to, żeby mieć program dostatecznie wyrafinowany, na miarę złożoności tych problemów, z którymi umie sobie radzić nasz mózg.

Myśl von Neumanna czeka na jej podjęcie przez badaczy; on sam ledwie ją naszkicował, przedwczesna śmierć przerwała ten wątek jego dociekań. Poprowadzić rzecz dalej powinni badacze łączący znajomość logiki i matematyki z wysoką kompetencją w neurobiologii.